

# CARTOGRAFÍA DETALLADA DE DIACLASAS. IMPLICACIONES PARA ZONAS DE DAÑO ALREDEDOR DE FALLAS DE CABALGAMIENTO.

Ruiz, M.C. <sup>1</sup>; Montes, C. <sup>2</sup>

## RESUMEN

Los estudios de zonas de daño a lo largo de fallas son de gran importancia en la migración de hidrocarburos y potenciales acuíferos, además de que sirven para predecir la estabilidad de taludes en el campo de la geotecnia. Es posible obtener una apreciación de la complejidad de una zona de daño por fallas a través de un estudio cuidadoso de las estructuras en afloramientos. Estas estructuras pueden ser descritas en términos de Topografía, Topología y Simetría.

Numerosos estudios han estado comúnmente sesgados a fallas normales y fallas de rumbo, así, los resultados aquí obtenidos difieren sustancialmente en términos de orientación y estilo. La falla estudiada tiene un desplazamiento máximo de aproximadamente 16 m, una longitud aproximada de 400 m, y una zona de daño de aproximada 100 m en el bloque colgante.

**Palabras clave:** Cartografía detallada, Diaclasas, Zonas de daño, Fallas de Cabalgamiento.

## DETAILED JOINTS MAPPING. IMPLICATIONS ON DAMAGE ZONE AROUND THRUSTING FAULTS.

### ABSTRACT

The studies of fault damage zone have great importance in the hydrocarbon migration and potentials aquifers, besides they serve to predict the stability of slopes in the field of geotechnical studies. It is possible to obtain an appreciation about the complexity of a damage zone produced by faults, through a careful study of the structures in outcrops. These structures can be described in terms of Topography, Topology and Symmetry.

Numerous studies have been commonly slanted to normal faults and strike – slip faults, thus, the results here obtained differ substantially in terms of orientation and style. The studied fault has a maximum displacement of about 16 m, approximated length of 400 m, and one damage zone of approximately 100 m in the hanging wall block.

**Keywords:** Detailed Mapping, Joints, Damage Zone, Thrust Faults.

## INTRODUCCIÓN

El estudio de las zonas de daño en afloramientos es un paso crucial para el modelamiento de los sellos por fallas y para la aproximación de la facilidad de flujo (Cerveny et al. 2004), además de su gran importancia en potenciales acuíferos y en la predicción de estabilidad de taludes en geotecnia. Para entender la complejidad de una zona de daño por falla es necesario realizar estudios

cuidadosos de las estructuras (fallas, diaclasas, fracturas) en exposiciones superficiales como pavimentos rocosos o afloramientos naturales. Zonas mineras abandonadas ofrecen una oportunidad única para medir y observar geometrías estructurales en escalas muy rara vez proporcionadas por afloramientos naturales. El objetivo de este trabajo es proponer una metodología para la cartografía detallada de diaclasas, además de presentar un ejemplo de una zona de daño en el bloque colgante de una falla de cabalgamiento.

---

<sup>1</sup> Smithsonian Tropical Research Institute. Carbones del Cerrejón. mariaceciliar@gmail.com

<sup>2</sup> Carbones del Cerrejón. camilo.montes@cerrejoncoal.com

Una zona de daño es el volumen de rocas deformado existente en torno a una falla principal que se ha originado a partir de la iniciación, propagación, interacción y desarrollo del deslizamiento a lo largo de las fallas pequeñas presentes entre bloques de fallas (Fisher y Knipe, 1998). El volumen deformado que irradia desde un segmento de falla principal puede dividirse en una zona de daño interna y una zona de daño externa. La zona de daño interna consiste habitualmente de rocas de falla intensamente deformadas que resultan difíciles de mapear en forma discreta, mientras que la zona externa posee una alta densidad de diaclasas que a menudo mantienen una orientación similar al segmento de falla principal (Kim et al., 2004). Numerosas poblaciones de fallas han sido objeto de considerables estudios en los últimos años. La mayoría de los trabajos han sido enfocados en fallas normales (Peacock y Sanderson 1991; McGrath, 1992; Villemin et al., 1995; Schlische et al., 1996) y fallas de rumbo (Segall and Pollard, 1983; Granier, 1985; Cruikshank et al., 1991a,b; McGrath and Davison, 1995; Martel and Boger, 1998; Kim et al., 2000, 2001a), y la única referencia conocida para fallas de cabalgamiento data de los años 70 (Elliot, 1976).

## MARCO GEOLÓGICO

Este trabajo fue desarrollado en una antigua zona de minería (tajo Tabaco 1) de la empresa Carbones del Cerrejón, Guajira (FIGURA 1).

El Complejo Carbonífero del Cerrejón está ubicado en la cuenca del río Ranchería, una región plana localizada en la parte sur de la península de la Guajira. La Formación Cerrejón está expuesta en un monoclinal simple buzando al SE en continuidad estructural con la Sierra Nevada de Santa Marta, y en contacto fallado al SE con la Serranía del Perijá a lo largo de la falla de cabalgamiento del Cerrejón. La zona de estudio está localizada en el flanco occidental del anticlinal de Tabaco, una estructura asimétrica amplia con buzamientos de aproximadamente 15 grados en el flanco occidental y más de 35 grados en el oriental; el eje del anticlinal tiene una dirección aproximada N-S y cabeceo al sur. El flanco occidental de este anticlinal está cortado por fallas de cabalgamiento con vergencia NW y rumbo NE con desplazamientos de decenas de metros y longitudes aproximadas de 2 km. Estas fallas convergen oblicuamente al eje del anticlinal donde son atenuadas en forma de pliegues asimétricos con vergencia NW. En

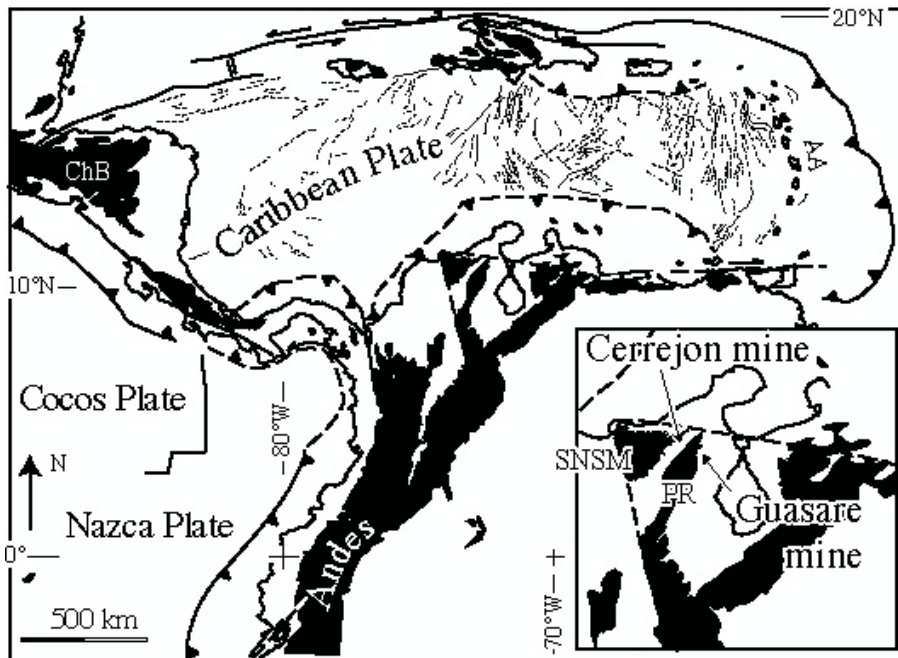


FIGURA 1. Localización Regional de la Cuenca carbonífera del Cerrejón.



FIGURA 2. Atenuación de la falla estudiada en pliegue asimétrico con vergencia NW.



FIGURA 3. Vista general de la zona de estudio.

el bloque colgante de una de estas fallas se desarrolló el estudio aquí resumido.

La zona de estudio comprende un área aproximada de 12.000m<sup>2</sup> y está dividida en tres subzonas (Zona 1, Zona 2 y Zona 3) de acuerdo con la ubicación con respecto a la zona de falla (FIGURAS 2 y 3), y la presencia de cobertura en el área de estudio que permita describir la geometría y continuidad de las diaclasas.

## METODOLOGÍA

Después de la localización de tres sectores (Zona 1, Zona 2, Zona 3) apropiados para la cartografía y el estudio de las estructuras geológicas más importantes, se delimitó la cobertura existente por medio de la toma de puntos continuos con el GPS para luego crear mallas de puntos también georeferenciados de 5 m \* 5 m utilizando clavos y pintura.

Para comprobar que las diaclasas no tienen un origen por fracturamiento debido a inestabilidad de taludes se

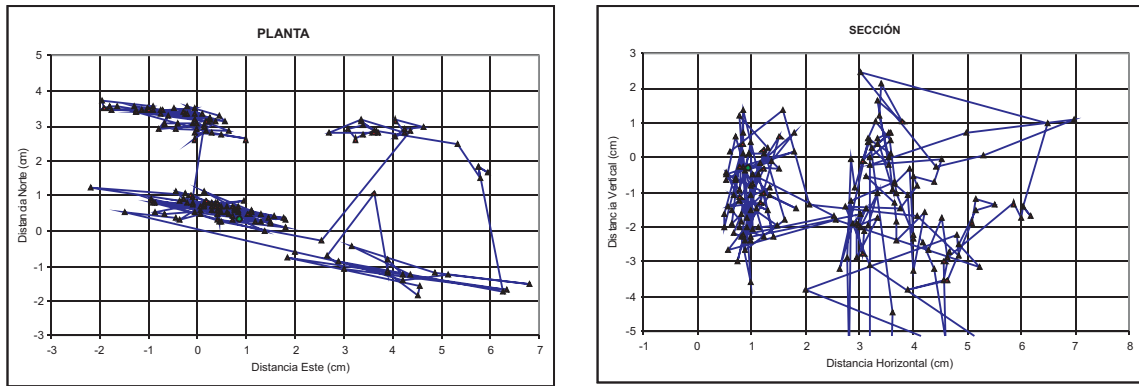


FIGURA 4. Resultados de las estaciones de monitoreo en la horizontal y vertical.

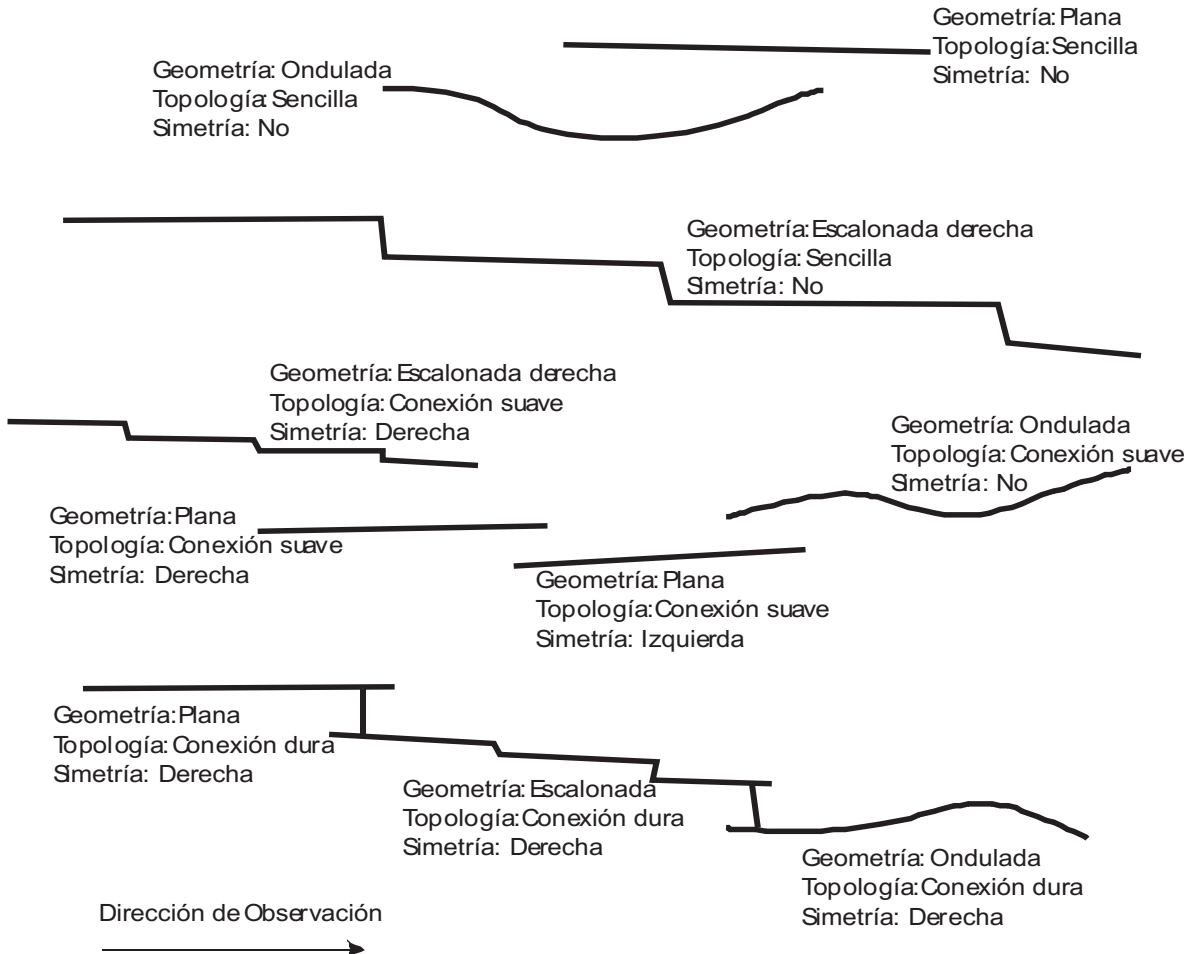


FIGURA 5. Parámetros para la clasificación de diaclasas.

consultaron las estaciones topográficas de control que la mina del Cerrejón tiene para monitoreo de taludes. Los datos de estas estaciones permitieron construir gráficas de posibles desplazamientos utilizando las coordenadas correspondientes a la estaciones en el tajo Tabaco 1 desde el año 2003 al 2005 (FIGURA 4).

Luego se utilizó el software ARCGIS para la generación de mapas (50 cm \* 70 cm) a escala 1:50 con la cobertura y la cuadrícula de puntos, que permitieron realizar la cartografía estructural de las zonas, midiendo con cinta la distancia en X y Y de cada una de las diaclasas con respecto al punto georeferenciado más cercano.

Posteriormente se digitalizaron los mapas de campo para finalmente crear un Sistema de Información Geográfico en ARCGIS, con el fin de categorizar y clasificar cada una de las diaclasas, donde a cada diaclasa fue asignada sus atributos de topografía, topología y simetría (FIGURA 5).

La Topografía se refiere a la geometría, forma, estilo de la fractura, la cual puede ser: Plana, Ondulada o Escalonada. Plana se refiere a una diaclasa que presenta una geometría cuasi-planar; ondulada, cuando en menos de 10 cm distancia la diaclasa muestra curvas suaves, y escalonada cuando en menos de 10 cm distancia la diaclasa presenta una geometría con cambios abruptos y angulares en forma de escalones.

La Topología tiene que ver con la continuidad y conexión de la fractura, y puede ser: Sencilla, Conexión Suave, Conexión Dura. La topología sencilla se refiere a una diaclasa que se encuentra aislada en la superficie

de observación; conexión suave, cuando la diaclasa se encuentra interrumpida a lo largo del rumbo, pero una diaclasa similar en orientación y estilo se encuentra a menos de 5cm; y conexión dura se refiere a una conexión directa entre dos diaclasas.

La Simetría da cuenta de la dirección y sentido del movimiento, puede ser: derecha, izquierda o que no se presente. Es a la derecha si la diaclasa tiene conexión, ya sea suave o dura, con otra diaclasa, y el salto se da a mano derecha, siempre observando desde arriba; e izquierda, lo contrario.

## RESULTADOS

A partir de la clasificación de cada una de las diaclasas, se tiene para cada zona:

### □ Zona 1

Presenta dos familias de diaclasas principales, con direcciones de N30°E/20°SE y N50°W/22°SW respectivamente, con longitudes que varían desde los 70 cm hasta los 14 m.

En la TABLA 1, se presentan las estadísticas para las 783 diaclasas de la Zona 1.

De acuerdo con los datos anteriores se puede inferir que la topografía predominante es Ondulada, la topología más común es en Conexión Dura y la gran mayoría de las diaclasas no presentan simetría (FIGURA 6).

TABLA 1. Datos generales de la Zona 1.

<b>TOPOGRAFÍA</b>				
Número Diaclasas	Plana	Ondulada	Escalonada Derecha	Escalonada Izquierda
	312	391	47	33
<b>TOPOLOGÍA</b>				
Número Diaclasas	Sencilla	Conexión Dura	Conexión Suave	
	29	643	111	
<b>SIMETRÍA</b>				
Número Diaclasas	Derecha	Izquierda	No	
	247	163	373	





FIGURA 6. Topografía Ondulada. Zona 1.

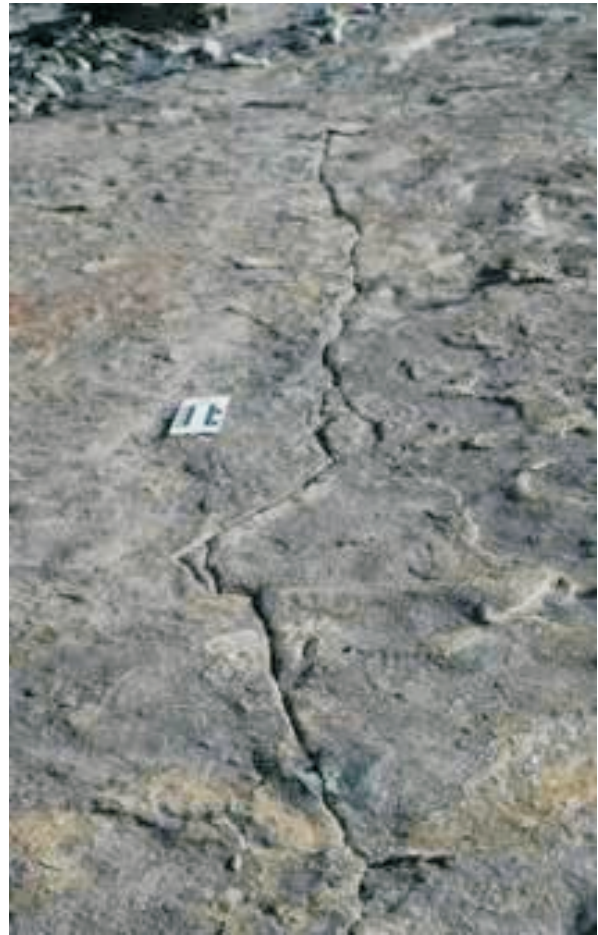
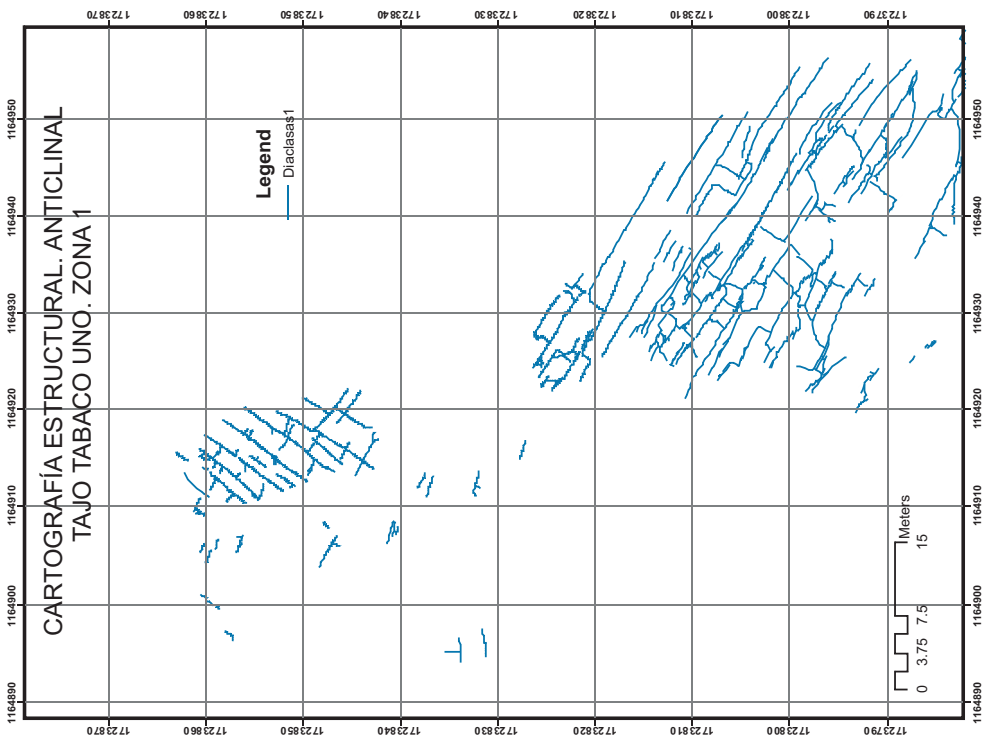
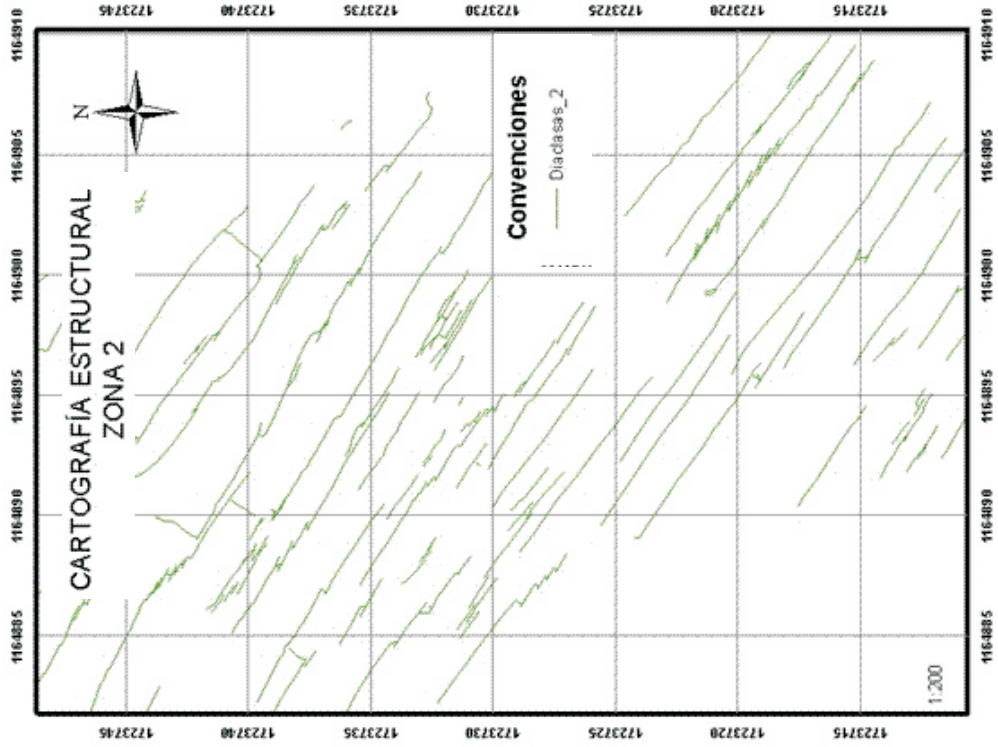


FIGURA 7. Topología en Conexión Dura y Simetría a la Derecha. Zona 2.

TABLA 2. Datos generales de la Zona 2.

<b>TOPOGRAFÍA</b>				
Número Diaclasas	Plana	Ondulada	Escalonada Derecha	Escalonada Izquierda
	281	313	31	4
<b>TOPOLOGÍA</b>				
Número Diaclasas	Sencilla	Conexión Dura	Conexión Suave	
	86	377	166	
<b>SIMETRÍA</b>				
Número Diaclasas	Derecha	Izquierda	No	
	265	127	237	



**FIGURA 8:** Familias de diachlases Zonas 1 y 2

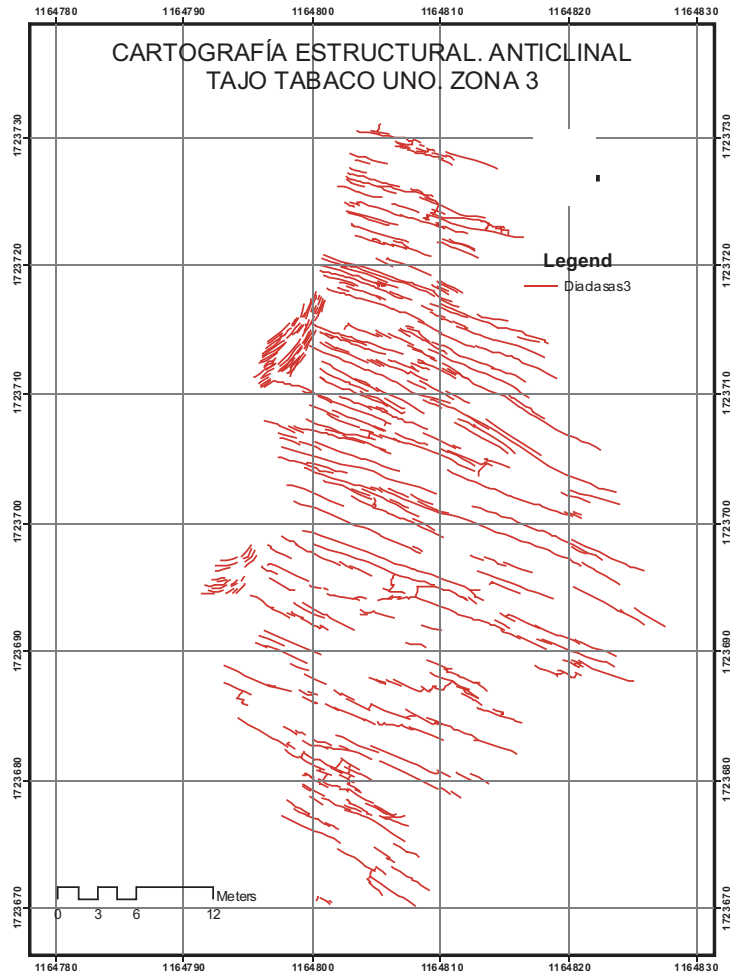


FIGURA 9. Familia de diaclasas. Zona 3.

TABLA 3. Datos generales de la Zona 3.

<b>TOPOGRAFÍA</b>				
Número Diaclasas	Plana	Ondulada	Escalonada Derecha	Escalonada Izquierda
	220	265	6	7
<b>TOPOLOGÍA</b>				
Número Diaclasas	Sencilla	Conexión Dura	Conexión Suave	
	96	149	253	
<b>SIMETRÍA</b>				
Número Diaclasas	Derecha	Izquierda	No	
	149	185	164	



□ **Zona 2**

Localizada en el Noreste del área de estudio. Presenta una familia de diaclasas principal con dirección predominante de N60°W/22°SW y longitudes que varían entre los 30 cm hasta los 12m.

En la TABLA 2, se presentan las estadísticas para las 629 diaclasas de la zona 2.

De acuerdo con los datos anteriores se puede inferir que la topografía predominante en la Zona 2 es Ondulada, con continuidades en Conexión Dura y Simetrías a la Derecha. (FIGURA 7).

□ **Zona 3**

Localizada en el sur del área de estudio. Presenta una familia de diaclasas principal de dirección N70°W/23°SW con un alta densidad de diaclasamiento (FIGURA 9).

En la TABLA 3, se presentan las estadísticas para las 498 diaclasas de la zona 3.

De acuerdo con los datos anteriores se puede inferir que la topografía predominante en la Zona 3 es Ondulada, topología en Conexión Suave y Simetría a la Izquierda.

Se observa que la Zona 1 es la zona de dominio de plegamiento con una baja densidad, pero alta conectividad; la Zona 2 es la zona de daño externa con densidad y conectividad media y la Zona 3 es la zona de daño interna con una alta densidad pero baja conectividad y predominio de simetría hacia la izquierda (FIGURA 10).

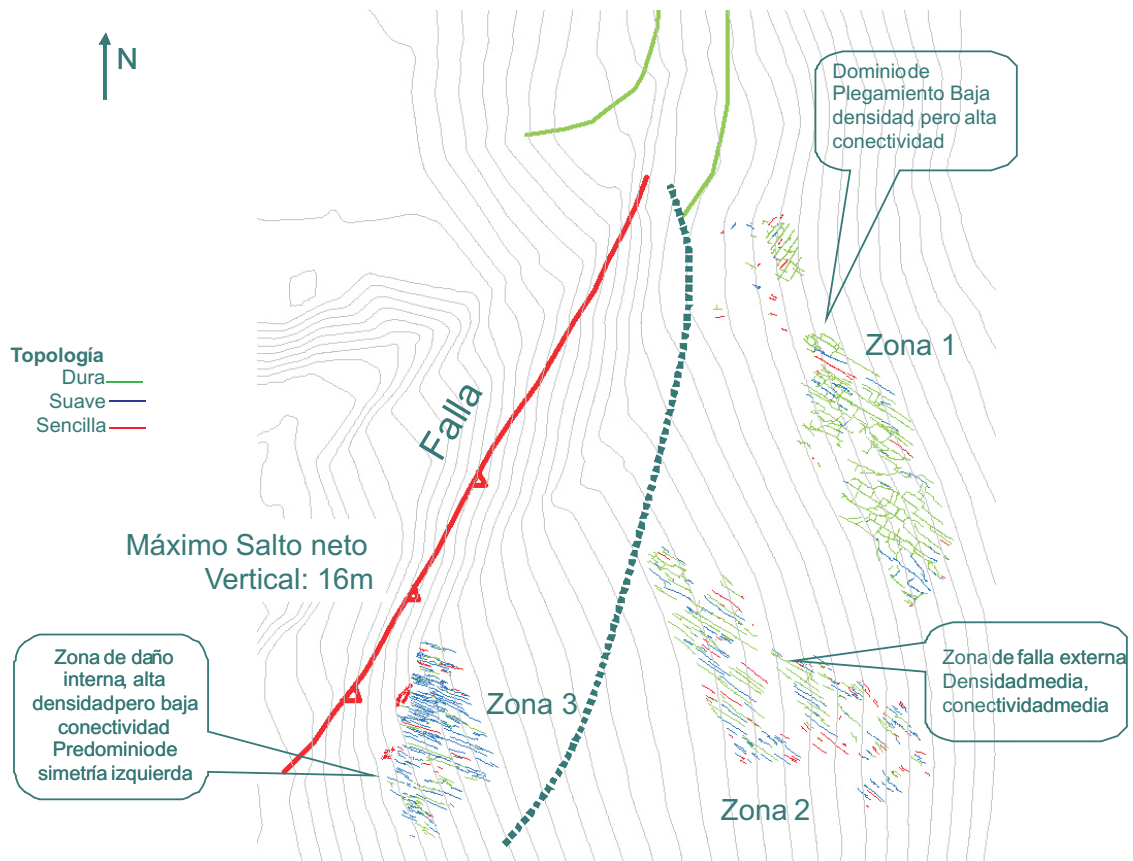


FIGURA 10. Definición de la Zona de daño de la Falla.

## CONCLUSIONES

Los estudios de zonas de daño a lo largo de fallas han estado comúnmente sesgados a fallas normales y fallas de rumbo, así, los resultados aquí obtenidos difieren sustancialmente en términos de orientación y estilo. En orientación, más notablemente las diaclasas de la Zona 3 (zona de daño interna) son perpendiculares al rumbo de la falla. En estilo, muestran una conectividad muy baja, que podría implicar, a pesar de su alta densidad, una impedancia alta al tránsito de fluidos. La falla estudiada tiene un desplazamiento máximo de aproximadamente 16 m, una longitud aproximada de 400 m, y una zona de daño de aproximadamente 100 m en el bloque colgante. Observaciones no cuantitativas en el área de trabajo indican que la zona de daño en el bloque yacente es mucho más estrecha.

La zona externa de daño (Zona 2) en fallas de cabalgamiento posee una densidad media de diaclasas con orientación perpendicular al segmento de falla principal. La Zona 1 está ubicada en la zona de plegamiento donde la falla se atenúa, mostrando orientaciones paralelas y perpendiculares al segmento de la falla principal.

## AGRADECIMIENTOS

A la Empresa Carbones del Cerrejón por la colaboración en la elaboración y ejecución del proyecto.

## REFERENCIAS

- Cervený, K., Davies, R. Reducing Uncertainty with Fault-Seal Analysis. *Oilfield Review*. Winter 2004/2005, pp 38-51.
- Cruikshank, K. M., Zhao, G., Johnson, A. M. (1991a). Analysis of minor fractures associated with joints and faulted joints. *Journal of Structural Geology* 13, pp. 865-886.
- Cruikshank, K. M., Zhao, G., Johnson, A. M. (1991b). Duplex structures connecting fault segments in Entrada Sandstone. *Journal of Structural Geology* 13, pp. 1185-1196.
- Elliot, D. (1976). Energy balance and deformation mechanisms of thrust sheets: *Royal Society of London Philosophical Transactions*, pp. 289-312.
- Fisher Q. J. and Knipe R. J. (1998). *Fault Sealing Processes in Siliciclastic Sediments*. The Geological Society Publishing House. Bath. Inglaterra.
- Granier, T. (1985). Origin, damping and pattern of development of faults in granite. *Tectonics* 4, pp. 721-737.
- Kim, Y. S., Andrews, J. R., Sanderson, D. J. (2000). Damage zones around strike slip fault systems and strike slip fault evolution, Crackington Haven, southwest England. *Geoscience Journal* 4, pp. 53-72.
- Kim, Y. S., Andrews, J. R., Sanderson, D. J. (2001 a). Reactivated strike slip faults: examples from north Cornwall, UK. *Tectonophysics* 340, pp. 173-194.
- Kim Y. S., Peacock D.C., Sanderson D. J.(2004). Fault Damage Zones. *Journal of Structural Geology*, 26, pp. 503-517
- Martel, S.J., Boger, W.A. (1998). Geometry and mechanics of secondary fracturing around small three-dimensional faults in granitic rock. *Journal of Geophysical Research* 103, 21299±21308.
- McGrath, A. G (1992). *Fault propagation and growth; a study of the Triassic and Jurassic from Watchet and Kilve, North Somerset (Masters thesis): London, Royal Holloway, University of London*. 165p.
- McGrath, A.G. and Davison, I. (1995). Damage zone geometry around fault tips. *Journal of Structural Geology* 17, pp. 1011-1024.
- Peacock, D.C., and Sanderson, D. J (1991). Displacements, segment linkage and relay ramps in normal fault zones. *Journal of Structural Geology*, 13, pp. 721-733.
- Schlische, R. W(1993). Anatomy and evolution of the Triassic-Jurassic continental rift system, eastern North America. *Tectonics*, 12, pp. 1026-1042.
- Segall and Pollard (1983). Nucleation and growth of strike slip faults in granite. *JGR* 88(B1), pp. 555-568.
- Villemin, T., Angelier, J., Sunwoo, C (1995). Fractal distribution of fault length and offsets. *New York. Plenum Press*, pp. 205-226.

---

Trabajo recibido: febrero 19 de 2007  
Trabajo aceptado: julio 4 de 2007